

# 섬유보강콘크리트 보의 전단거동에 미치는 강섬유의 효과

## Steel Fibers Efficiency as Shear Reinforcement in Concrete Beams

문제길\*                      홍익표\*\*  
Moon, Je Kil    Hong, Ik Pyo

---

### 요 약

본 논문은 전단철근을 갖지 않는 강섬유보강콘크리트 보의 전단거동을 규명하고 균열전단강도와 극한전단강도를 예측하기 위한 것으로 섬유로 보강된 11개의 보를 포함한 총 14개의 보에 대한 실험을 수행하였다. 실험의 변수는 섬유혼입율과 전단지간 등이며, 실험과정을 통해 파괴형상, 처짐, 균열전단강도 및 극한전단강도를 측정하였다.

실험결과로 부터 섬유의 혼입량이 많아지고 전단지간이 짧아질 수록 섬유보강콘크리트 보의 균열 및 극한전단강도가 증가됨을 밝혔다. 그리고 실험결과를 회귀분석하여 균열전단강도와 극한전단강도 추정식을 제안 하였으며, 제안된 식에 의해 강섬유의 혼입으로 얻어지는 전단강도에 대한 섬유의 기여효과를 추정할 수 있었다. 또한, 제안된 추정식에 의해 계산된 값과 실험결과를 비교 검토하여 그 상관성을 확인하였다.

### Abstract

There have been conducted a lot of works on shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams. Fiber reinforced concrete beams without shear reinforcement were tested to determine their cracking shear strengths and ultimate shear capacities. Results of tests on 14 reinforced concrete beams (including 11 containing steel fibers) are reported. Two parameters were varied in the study, namely, the volume fraction of fibers and shear span-to-depth ratio.

The effects of fiber incorporation on failure modes, deflections, cracking shear strength, and ultimate shear strength have been examined. Resistance to shear stresses have been found to be improved by the inclusion of fibers. The mode of failure changed from shear to flexure when the shear span-to-depth ratio exceeds 3.4. Based on these investigations, a method of computing the shear strength of steel fiber reinforced concrete beam is suggested. The comparisons between computed values and experimentally observed values are shown to verify the proposed theoretical treatment and steel fibers efficiency.

**Keywords :** fiber reinforced concrete, cracking shear strength, ultimate shear strength, fiber volume fraction, shear span-to-depth ratio, shear failure, ultimate flexural moment, regression analysis, steel fibers efficiency.

---

\* 정희원, 건국대학교 토목공학과 교수  
\*\* 정희원, 안양전문대학 토목과 부교수

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 6월 30일까지 학회로 보내  
주시면 1994년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

콘크리트의 인장강도를 초과하는 주인장응력이 콘크리트보의 전단지간에 작용할 때 부재의 사방향 균열이 복부에 생기게 되며 결국은 보를 파괴시키게 된다. 또한 콘크리트의 취성은 부재에 초기균열이 형성된 후 매우 빠른 속도로 보를 파괴시키는 원인이 된다.

콘크리트에 강섬유가 혼입되면 콘크리트내에 균등하게 분산되는 섬유들의 균열억제기구에 의해 콘크리트의 취성특성이 변화하여 상당한 연성을 갖도록 하는 효과가 있다.<sup>(1, 2)</sup> 또한 강섬유보강 콘크리트는 섬유가 복부철근보다 좁은 간격으로 콘크리트내부에 분산되고, 부재가 하중을 받아 초기전단균열이 발생한 후 극한전단하중에 이르기까지 섬유가 부착이탈되기에 필요한 부가적인 에너지를 가지므로 스티럽이나 절곡철근만을 사용하는 것보다 유리한 점을 갖는다.<sup>(3, 4)</sup> 따라서 종래의 철근콘크리트 부재를 섬유로 보강하면 섬유가 전단철근의 역할을 대신하기도 하고, 보와 기둥이 만나는 곳 같은 철근보강의 한계단면에서 철근이 밀집되는 것을 방지할 수 있다.<sup>(5)</sup>

1972년 Batson 등<sup>(4)</sup>이 보에 강섬유를 보강하면 스티럽의 대체효과를 갖는다는 연구결과를 발표한 이래, 1987년 Mansur 등<sup>(6)</sup>은 강섬유보강콘크리트 보의 전단강도실험을 통해 철근콘크리트 부재의 설계목적으로 규정된 ACI규준식을 강섬유보강콘크리트에 이용할 수 있다는 연구결과를 발표했다. 또한, Narayanan 등<sup>(7)</sup>은 1987년 자신들의 실험성과와 다른 연구들에서의 실험자료를 회귀분석하여 섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도와 극한전단강도 추정식을 제안했다. 국내에서는 1993년 복부보강이 없는 철근콘크리트 보에 강섬유를 혼입한 실험결과를 가지고 강섬유보강콘크리트 보의 균열 및 극한전단강도 추정식을 발표했다.<sup>(8)</sup> 이상의 연구들에서 콘크리트 보에 강섬유가 혼입되면 상당한 량의 전단보강효과가 있음을 알았으나 콘크리트 보의 전단강도에 섬유가 미치는 효과를 명확히 규명하기에는 부족하였다.

본 연구는 종방향의 인장철근을 갖는 섬유보강콘크리트 보에서 강섬유의 혼입으로 인한 복부전

단보강 효과를 규명하고자 하는 것이다. 최근 장대지간의 교량이나 고층건물 등의 시공에 점차 사용이 확대되고 있는 압축강도  $400\text{kg}/\text{cm}^2$  정도의 비교적 고강도콘크리트에서 강섬유의 혼입효과를 알아보기 위해 섬유의 혼입량을 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%등으로 변화시켜 변수로 사용하였으며, 종래의 연구들에서 보의 전단강도에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 전단지간을 변화시켜 실험을 수행하였다.

섬유보강콘크리트의 전단특성을 알아보기 위한 실험적 연구들<sup>(4, 5, 7, 9)</sup>은 실험체의 대부분을 섬유로 보강한 철근콘크리트 보로 만들어 연구를 수행하였으나 본 논문은 강섬유의 보강이 철근콘크리트 보의 전단에 미치는 영향을 명확히 규명하기 위해 동일한 재료, 형상, 치수, 시험조건을 갖는 보를 거의 같은 갯수의 전단철근을 갖지 않는 철근콘크리트 보와 섬유보강콘크리트 보로 제작하여 그 실험결과를 비교하였다. 총 14개의 보에 대한 실험에서 전단파괴되는 보의 파괴형상, 하중-처짐 관계, 전단강도 등을 측정 및 분석하고 여기에, 본 연구진에 의해 본 연구와 동일한 방법으로 얻어진 36개의 보에 관한 실험결과<sup>(8)</sup>를 합하여 총 50개의 보에 대한 자료를 비교 검토하였다. 측정된 자료로 회귀분석을 실시하여 강섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도와 극한전단강도 추정식을 제안하였으며, 제안된 식으로부터 철근콘크리트 보에 강섬유가 혼입되므로써 얻어지는 전단강도에 대한 섬유의 기여효과를 추정할 수 있었다. 그리고 계산된 추정값과 본 연구에서 얻어진 측정값을 비교 분석하여 제안된 전단강도 추정공식의 타당성을 확인하였다.

## 2. 섬유보강콘크리트의 해석방법

### 2.1 섬유계수

섬유보강콘크리트에서 섬유의 혼입으로 인한 인장강도와 연성의 개선은 균열이 발생하기 전에는 콘크리트내의 섬유혼입율에 영향을 받고, 균열이 발생한 후 균열이 진전되고 확장될 때는 섬유의 저항에 좌우된다.<sup>(7)</sup> 큰 섬유형상비(aspect

ratio)를 갖는 섬유는 매우 큰 뽑힘강도를 갖는 것으로 밝혀졌고, 크림프(crimp)되거나 툽니모양을 갖는 섬유는 등근 수직섬유에 비해 부착특성이 개선됨이 보고되었다.<sup>(3)</sup> 강섬유보강콘크리트의 강도에 영향을 주는 섬유혼입율  $\rho_f$ , 섬유의 형상비  $l_f/d_f$ , 섬유와 매트릭스의 부착계수  $\beta$  등 3가지의 영향을 섬유계수(fiber factor) F라 하는 복합변수로 합성시켜 다음과 같이 나타낸다.<sup>(9)</sup>

$$F = (l_f/d_f) \rho_f \beta \quad (1)$$

여기서,  $\beta$ 는 섬유의 각기 다른 부착특성에 의해 계산된 것으로 뽑기(pull out)실험에 의하면 횡단면이 원형일 때 0.5, 크림프되거나 단부갈고리가 있으면 0.75, 툽니모양이면 1.0 이다.

## 2.2 섬유보강콘크리트의 활열인장강도

콘크리트의 활열인장강도는 실험의 수행이 간단하고 일관된 결과를 보여주기 때문에 섬유보강콘크리트에서 정확한 인장강도를 평가하는데 가장 신뢰성 있는 실험이다.<sup>(10)</sup> 또한, 섬유보강콘크리트 보가 하중을 받아 파괴될 때의 파괴형상이 활열인장강도실험에서 원주형공시체의 파괴와 유사하기 때문에 이를 비틀림전단강도의 측정목적으로도 사용하고 있다.

섬유보강콘크리트의 활열인장강도 실험결과가 유용치 않거나 활열인장도실험을 수행하지 못했을 경우에 회귀분석에 의한 다음과 같은 공식을 이용할 수 있는데, 섬유보강콘크리트의 활열원주형공시체 인장강도  $\sigma_{spf}$ 는 섬유보강콘크리트 원주형공시체 압축강도  $\sigma_{cf}$ 와 섬유계수 F를 가지고 다음 식으로 구할 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$\sigma_{spf} = (1.25\sigma_{cf}/A_0) + B_0 + C_0\sqrt{F} \quad (2)$$

여기서,  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$ 는 계수로서  $A_0$ 는  $20-\sqrt{F}$ 의 무차원,  $B_0$ 는  $7.1\text{kg}/\text{cm}^2$ ,  $C_0$ 는  $10.2\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다.

## 2.3 섬유보강콘크리트 보의 전단강도

### 2.3.1 균열전단강도

현재 섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도를 예측하는 신뢰할 만한 방법은 아직 없다. 1987년 Narayanan 등<sup>(7)</sup>은 가늘고 긴 강섬유보강콘크리트 보에 대한 33개의 실험결과를 근거로 강섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도  $v_{cf}$ 를 추정하는 반실험적 공식을 제안했는데 이는 섬유보강콘크리트의 활열인장강도와 인장철근비  $\rho_s (=A_s/bd)$ , 전단지간-유효높이 비  $a/d$ , 섬유계수 F를 이용한 것으로 다음과 같다.

$$v_{cf} = A \sigma_{spf} + B \rho_s d/a + C F \quad (3)$$

여기서, A, B, C는 계수로 A는 0.24의 무차원, B는  $204\text{kg}/\text{cm}^2$ , C는  $5.1\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다.

국내에서는 1993년 복부보강이 없는 36개 보의 실험결과를 회귀분석하여 강섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도를 예측할 수 있는 다음과 같은 식을 제안했다.<sup>(8)</sup>

$$v_{cf} = A' \sigma_{spf} \rho_s^{1/3} d/a + B' F \quad (4)$$

여기서,  $A'$ 와  $B'$ 는 계수로서  $A'$ 는 4.18의 무차원,  $B'$ 는  $11.07\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다.

### 2.3.2 극한전단강도

철근콘크리트 보에 작용하는 극한전단력은 압축구역을 가로지르는 전단력  $V_c$ 와 인장(종방향) 철근의 연결작용에 의한 힘  $V_d$ , 균열면에서 골재의 맞물림에 의한 수직합성력  $V_a$  등이 저항한다고 본다. 여기에 섬유가 첨가되면 균열면을 따라 발생하는 섬유의 뽑힘에 저항하는 수직합성력  $V_b$ 가 극한전단력에 추가되어 섬유보강콘크리트 보의 극한전단력  $V_{uf}$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$V_{uf} = V_a + V_b + V_c + V_d \quad (5)$$

철근콘크리트 보를 섬유로 보강하면 콘크리트의 인장강도와 변형특성이 신뢰할 수 있도록 개선되고 변화되므로 섬유에 의해 발생하는 수직합성

력  $V_b$ 를 정확히 추정하는 것이 섬유보강콘크리트 보의 극한전단강도 예측에 필요하게 된다.

Romualdi 등<sup>(11)</sup>은 콘크리트내부에 랜덤(random)하게 분산된 길이  $l_f$ 의 섬유가 Fig. 1과 같이 존재할 때 x축으로  $l_f \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi$ 의 값을 가지게 되므로 x방향의 평균섬유길이  $l_{fx}$ 를 다음과 같이 나타냈다.

$$l_{fx} = 0.41 l_f \quad (6)$$

여기서, 식 (6)을 이용해 단위면적당 섬유의 갯수  $\eta_f$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\eta_f = \frac{1.64\rho_f}{\pi d_f^2} \quad (7)$$

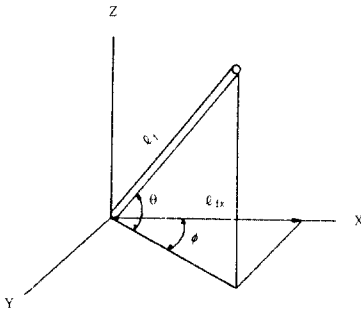


Fig. 1 Fiber of length  $l_f$  in random of orientation

사인장균열이 Fig. 1과 같이  $\alpha$ 의 경사를 갖고 길이가  $j \cdot d / \sin\alpha$ 이며, 섬유의 평균뿔힘길이가  $0 \sim l_f/2$ 의 범위에 있다고 가정하면 섬유의 뿔힘저항응력  $\nu_f$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nu_f = 0.41 (l_f/d_f) \rho_f \gamma \quad (8)$$

식 (8)은  $\alpha$ 를 45°로 가정하여 계산한 것이며, 이 식에 섬유의 각기 다른 부착특성을 나타낸 식 (1)의  $\beta$ 를 고려하면 다음의 식을 얻는다.

$$\nu_f = 0.41 \gamma F \quad (9)$$

여기서,  $\gamma$ 는 섬유의 평균부착응력이다.

콘크리트내부에 강섬유가 첨가되면 섬유의 부착은 점착과 마찰의 합성력과 기계적 맞물림에 좌우된다. 섬유보강콘크리트 보의 극한전단강도 예측을 위해 1987년 Narayanan 등<sup>(7)</sup>은 91개 보의 실험결과에 근거하여 보의 총 전단강도를 1) 섬유보강콘크리트의 활열인장강도  $\sigma_{spf}$ , 2) 인장철근비  $\rho_s$ 와  $a/d$ 에 의한 연결작용, 3) 사인장균열 주위의 섬유의 뿔힘응력  $\nu_f$  등 3가지 항으로 구성된 다음과 같은 추정식  $\nu_{uf}$ 를 제안했다.

$$\nu_{uf} = e [A \sigma_{spf} + D \rho_s d/a] + \nu_f \quad (10)$$

여기서, D와 e는 계수로 D는 816kg/cm<sup>2</sup>이며, e는 보의 아치작용을 고려한 무차원 값으로 다음과 같다.

$$e = 1.0 \quad \text{a/d} > 2.8 \text{ 일 때}$$

$$e = 2.8 d/a \quad \text{a/d} \leq 2.8 \text{ 일 때}$$

1986년 Sharma<sup>(12)</sup>는 자신의 실험결과와 다른 연구들에서의 실험결과를 이용해 다음과 같이 섬유보강콘크리트의 극한전단강도  $\nu_{uf}$ 를 예측할 수 있는 공식을 제안하기도 했다.

$$\nu_{uf} = k \sigma_{ct} (d/a)^{1/4} \quad (11)$$

여기서, k는 무차원계수로 섬유보강콘크리트의 인장강도  $\sigma_{ct}$ 를 직접시험에 의하여 얻으면 1.0, 간접(활열)시험에 의해 얻으면 2/3, 100mm 정4각형단면 보의 파괴계수로 부터 얻으면 4/9를 사용한다.

또한, 1993년 국내에서는 36개 보의 실험결과를 회귀분석하여 강섬유보강콘크리트 보의 극한전단강도  $\nu_{uf}$ 를 추정할 수 있는 다음 식을 제안하였다.<sup>(8)</sup>

$$\nu_{up} = C' \sigma_{spf} \rho_s^{1/3} d/a + \nu_f \quad (12)$$

여기서, C'는 무차원계수로 6.50의 값을 가진다.

### 3. 실험

#### 3.1 사용재료

시멘트는 국내에서 생산되는 제1종 보통포틀랜드시멘트로 비중이 3.10이상인 것을 사용하였으며, 잔골재는 비중이 2.59인 한강산 모래로 조립을 2.98의 것을, 굵은골재는 비중이 2.70인 안양산 쇄석으로 조립을 6.36인 것을 사용하였다.

강섬유는 양단에 갈고리(hook)가 있는 Belgium BEKAERT사의 Dramix섬유를 사용하였으며, 이는 개개의 섬유가 수용성 아교다발로 붙어있어 콘크리트 반죽 속에서 분산이 용이하도록 만들어진 것으로 비중 7.85, 직경 0.5mm, 길이 30mm로서 형상비(aspect ratio :  $l_f/d_f$ )가 60인 것이다. 실험용 보의 제작에 사용된 인장철근은 일반적으로 사용되는 SD 30 철근으로 항복강도가  $3.148\text{kg/cm}^2$ 이고 탄성계수가  $2.04 \times 10^6\text{kg/cm}^2$ 였다.

콘크리트의 고강도화와 시공성의 향상을 위해서 ASTM C 49 Type F로 규정된 나프타린계 고강도 감수제 DAREX SUPER 20을 사용하였으며 비중은 1.21이었다.

#### 3.2 배합설계

굵은골재는 최대치수 13mm의 것을 사용하였으며, 이에 적합한 최소의 잔골재율은 실험에 의해 43%로 정하였다. 배합은 시공성의 확보를 위해 예비실험을 통해 콘크리트의 재령 28일 압축강도  $400\text{kg/cm}^2$  정도를 얻도록 단위시멘트량  $400\text{kg/m}^3$ , 단위수량  $165\text{kg/m}^3$ , 단위잔골재량  $786\text{kg/m}^3$ , 단위굵은골재량  $1087\text{kg/m}^3$ 으로 하였으며, 강섬유의 투입으로 인한 워커빌리티의 개선을 위해 반죽시에 고강도 감수제  $4\text{kg/m}^3$ 을 첨가하였다.

강섬유의 혼입량에 따른 섬유보강효과를 알아보기 위해 섬유혼입율  $\rho_f$ 은 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%의 4가지로 나누어 실험을 실시하였다.

#### 3.3 실험보의 설계

실험보의 단면형상은 폭(b)이 10cm, 유효높이(d)가 17cm, 총높이(h)가 20cm인 단철근 직각형으로 부재의 총길이는 57~194cm이고, 지간(L)은 47~184cm이며, 인장철근량  $A_s = 3.801\text{cm}^2(3-D13)$ 를 배치하여 강도설계법에 따른 과소철근보로 설계하였다. 복부의 전단보강이 없기 때문에 모든 부재가 전단파괴를 일으키도록 제작되었다. 실험부재의 지간변화는 콘크리트부재의 전단강도에 주요변수로 알려진 전단지간-유효높이 비(a/d)를 1.4, 3.4, 5.4등으로 변화시키기 위해서이며, 특히 섬유혼입을 1.0%( $F=0.45$ )의 콘크리트에서는 이들 사이에 2.4와 4.4의 a/d를 추가시켜 실험부재의 전단지간변화에 따른 전단강도특성의 변화추이를 알아보았다.

실험부재의 단면형상, 치수 및 게이지 부착위치 등은 Fig. 2와 같으며, 하중재하점과 지지부에서의 하중집중으로 인한 국부적인 지압파괴를 방지하기 위해 강판을 사용하였다.

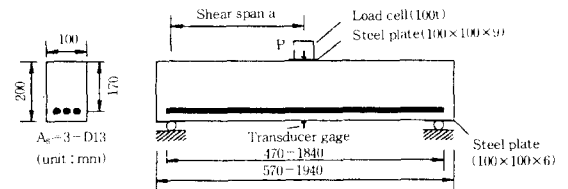


Fig. 2 Details of test beams

#### 3.4 실험체의 제작 및 양생

콘크리트의 반죽은 30ℓ 용량의 회전식 믹서로 굵은골재와 잔골재를 넣고 30초정도 혼합한 후 시멘트를 넣어 각 재료가 충분히 고르게 분산된 뒤에 물을 첨가하여 다시 1분간 혼합하였다. 반죽이 끝난 후 슬럼프가 측정되었으며, 슬럼프값을 측정한 다음에는 이에 알맞는 혼화제량을 첨가하여 충분히 재료가 비벼지면 회전되는 믹서 속에 강섬유를 손으로 투입하여 섬유가 고르게 분산될 때까지 반죽을 계속하였다. 섬유가 혼입된 콘크리트의 워커빌리티를 알기 위해 다시 슬럼프시험을 실시하

였다.

반죽된 콘크리트로 압축 및 활열인장강도 실험용 지름 10cm, 높이 20cm의 원주형공시체를 섬유 혼입률이 따라 3개씩 총 24개를 만들었으며, 시간 변화에 따른 전단강도실험용 보 공시체 14개를 제작하였다.

전단강도실험용 부재 제작에 사용된 거푸집은 두께 10mm의 강판으로 만들어 거푸집의 변형을 방지했다. 콘크리트의 타설시에는 붓으로 충분한 다짐을 실시하였으며, 모든 공시체는 제작 48시간 뒤에 탈형하여 살수한 후 마포를 덮고 비닐로 밀폐시켜 재령 25일까지 습윤양생을 실시하였다. 각 공시체는 재령 25일 후 대기중에 노출시켜 재령 28일에 해당되는 실험을 실시하였다.

### 3.5 실험장치 및 방법

압축강도와 활열인장강도 실험은 100t 용량의 유압식 만능시험기를 사용하여 KS F 2405(콘크리트의 압축강도시험방법)와 KS F 2423(콘크리트의 인장강도시험방법)에 따라 시행하였다.

전단강도실험에서 실험부재의 지지조건은 단순 보이며, 3점하중재하방식으로 중앙부에서 연직하중을 가하는데 하중보정을 위해서는 100t 용량의 로드셀(load cell)을 이용하고, 하중재하점의 지압 파괴와 편심재하를 방지하기 위해 재하점을 Fig. 2와 같은 두께 9mm, 폭 10cm의 정4각형 강판으로 보강했다. 실험부재의 중앙점 하부에는 치짐측정을 위해 트랜스듀서(transducer)를 설치하여 하중증가에 따른 변위량을 X-Y 레코더(recorder)로 기록하였으며, 각 하중단계마다 균열형상 및 균열폭을 최소독치 0.01mm의 광학균열측정기(eye gage)로 측정하여 기록하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 기본 강도실험

기본 강도실험은 공시체 제작 후 재령 28일에 수행되었으며, 섬유혼입율을 변수로 한 이들 실험의 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Strength properties of concrete

Fiber Content, $\rho_f$ (%)	Fiber Factor, F	Slump (cm)	W/C (%)	Compressive Strength, $\sigma_c$ or $\sigma_{cf}$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Splitting Tensile Strength	
					Observed, $\sigma_{sp}$ or $\sigma_{spf}$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Calculated Eq. (2) ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
0.0	0.00	13	41	411	40.8	-
0.5	0.23	6	41	441	42.4	40.2
1.0	0.45	3	41	455	50.9	43.4
1.5	0.68	0	41	518	57.1	49.2

#### 4.1.1 압축강도

섬유보강콘크리트의 압축강도는 강섬유의 혼입율이 증가함에 따라 Fig. 3과 같이 증가했으며 섬유계수 F가 0.68( $\rho_f=1.5\%$ )에서 최대 26%의 증가를 보였으나, 섬유계수 F가 0.23( $\rho_f=0.5\%$ )에서는 8%정도의 증가에 불과했다.

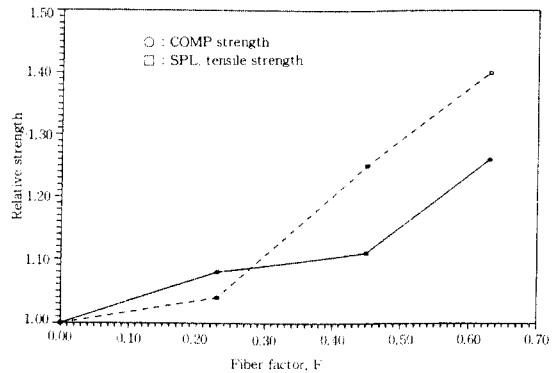


Fig. 3 Variation of each strength as a function of fiber factor

#### 4.1.2 활열인장강도

강섬유의 혼입율이 증가함에 따라 섬유보강콘크리트의 활열인장강도는 Fig. 3과 같이 증가했으며, F가 0.23에서는 4%정도의 작은 증가율을 나타냈으나 F가 0.68일때는 40%의 높은 증가를 보였다.

본 실험에서 수행한 활열인장강도 실험결과와 식(2)에 의해 얻어진 값들을 비교한 Table 1에서 F가 0.23일 때 측정된 값이 식(2)에 의한 값보다 5%정도 크게 나타났으나 F가 0.45와 0.68로 증가 되며는 15%에 이르는 큰 차이를 보였다. 따라서, 섬유보강콘크리트 보의 정확한 전단강도 추정을

위해서는 실험에 의한 활열인장강도 값의 사용이 바람직하다고 생각된다.

## 4.2 전단거동

### 4.2.1 파괴형상

실험 보에 어떤 일정한 하중이 작용하면  $a/d$ 가 1.4에서 3.4에 이르는 비교적 짧은 기간을 갖는 보의 복부에는 전단균열이 발생하는데 이들 짧은 보의 초기균열은 대부분 복부의 중앙부에서 생성되어 전단으로 파괴되었다.  $a/d$ 가 4.4와 5.4인 비교적 긴 기간을 갖는 실험 보에서는 일정한 하중이 작용하면 보의 지간 중앙 하중재하부 하단에 인장균열이 발생하고 이들 균열은 약간의 추가하중을 받은 후 휨으로 파괴되었다.

실험한 보는 전단 또는 휨으로 파괴되었으며 이들 보의 파괴형태는 Fig. 4와 같이  $a/d$ 에 따라 변화되었다.  $F$ 가 0.45( $\rho_f=1.0\%$ )인 보의 파괴형상을 나타낸 Fig. 4는  $a/d$ 가 1.4에서 2.4, 3.4, 4.4, 5.4에 이르도록 변화된 경우로  $a/d$  1.4에서는 순수전단,  $a/d$  2.4에서는 전단압축,  $a/d$  3.4에서는 사인장으로 파괴되었으며,  $a/d$ 가 4.4와 5.4인 경우는 휨으로 파괴되었다.

$a/d$ 가 작은 보는 초기균열이 형성된 후 아치작용에 의해 많은 추가하중을 받으나 큰  $a/d$ 를 갖는 보는 초기균열이 발생된 후 파괴가 갑자기 이루어졌다.

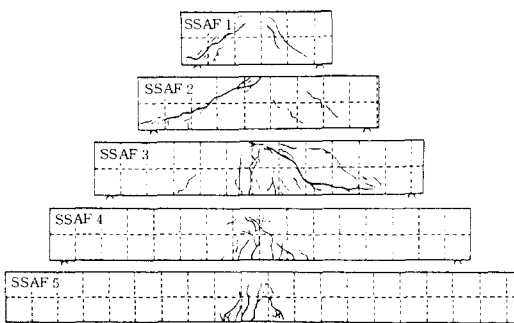


Fig. 4 Crack patterns for test beams( $F=0.45$ )

이상의 과정을 통해 실험보들은 보에 발생한 초기균열이 하중이 증가함에 따라 점차 진전되고 또

한 확장되어 극한하중에 도달하면 파괴되는데 파괴되기 직전에는 부재의 표면에 밀착된 섬유유리 부착이탈로 인하여 표면의 콘크리트가 부스러지면서 발생하는 것이라 생각되는 작은 소리들을 들을 수 있어 파괴를 예감할 수 있었으며, 강섬유로 보강된 모든 보의 파괴는 철근콘크리트 보와는 달리 박리현상이 생기지 않았다. 강섬유보강콘크리트 보의 모든 파괴 단면에서 어느 경우에도 강섬유 자체의 끊어짐은 볼 수 없었다.

### 4.2.2 하중-처짐 관계

모든 실험 보들은 초기균열하중에 이르기까지 거의 선형적인 거동을 했으나, 그 이후부터 극한전단하중에 이르기까지의 변형은 비선형에 가까운 것이었다.

Fig. 5는  $a/d$ 가 3.4일 때  $F$ 가 0, 0.23, 0.45, 0.68 등으로 변화되는 경우로써 철근콘크리트 보에 강섬유를 보강하면 섬유혼입량의 증가에 따라 극한전단강도가 증가했다. 또한, 섬유가 혼입되지 않은 보 SSAF2는 극한전단하중을 받은 후 갑작스러운 파괴로 처짐을 측정하지 못했으나, 섬유가 혼입된 보 SSAF7, SSAF3, SSAF10 등은 극한전단하중을 받은 후에도 상당량의 처짐을 측정할 수 있어 강섬유의 혼입이 보의 연성 및 인성에 미치는 영향을 알 수 있었다.

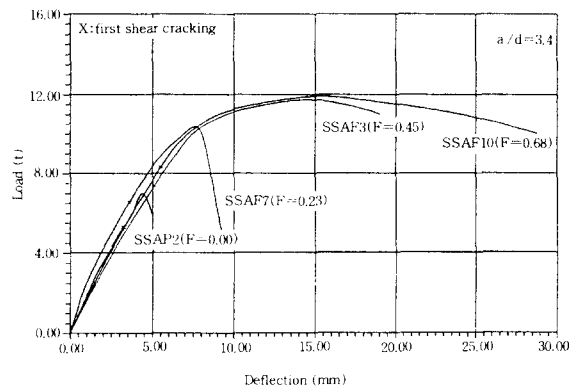


Fig. 5 Load versus central deflection curves

### 4.3 전단강도

각 보의 실험에서 초기균열이 발견되었을 때의 전단하중을 보의 유효단면적( $bd$ )으로 나누어 균열전단강도  $v_{co}$ 라 하고, 최대 전단하중을 받았을 때 이 전단하중을 보의 유효단면적으로 나누어 극한전단강도  $v_{uo}$ 라 하여 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Beam details and test results

Beam No.	Span (cm)	a/d	$\rho_f$ (%)	Fiber Factor ,F	Shear Strength (kg/cm <sup>2</sup> )		Failure Mode	
					$v_{co}$	$v_{uo}$		
SSAP 1	47	1.4	0.0	0.00	28.41	52.29	Proper Shear	
	115	3.4	0.0	0.00	15.56	20.56	Diagonal Tension	
	184	5.4	0.0	0.00	14.88	18.03	Flexural	
SSAF 1	47	1.4	1.0	0.45	37.24	63.56	Proper Shear	
	2	81	2.4	1.0	26.91	36.47	Shear Compression	
	3	115	3.4	1.0	21.59	34.53	Diagonal Tension	
	4	150	4.4	1.0	19.82	22.85	Flexural	
	5	184	5.4	1.0	0.45	16.56	19.59	Flexural
SSAF 6	47	1.4	0.5	0.23	31.79	61.53	Proper Shear	
	7	115	3.4	0.5	19.26	30.44	Diagonal Tension	
	8	184	5.4	0.5	0.23	15.62	18.74	Flexural
SSAF 9	47	1.4	1.5	0.68	40.06	67.15	Proper Shear	
	10	115	3.4	1.5	0.68	24.41	35.03	Diagonal Tension
	11	184	5.4	1.5	0.68	17.74	19.79	Flexural

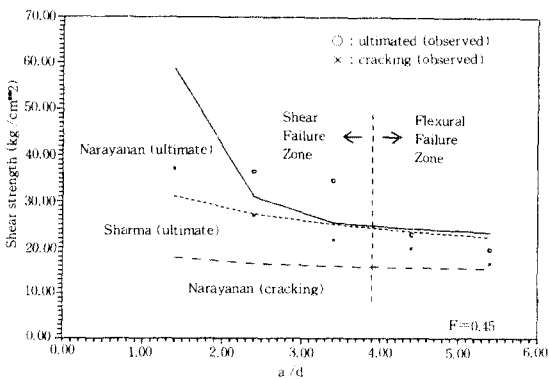


Fig. 6 Relationship between shear strength and a/d

모든 보의 균열전단강도와 극한전단강도 실험 값은 전단지간-유효높이의 비  $a/d$ 가 작아지고 섬유계수  $F$ 가 커짐에 따라 증가했다.

Fig. 6은  $a/d$ 의 변화에 따른 보의 전단강도를 나타낸 것으로 Narayanan 등<sup>(7)</sup>에 의해 제안된 균

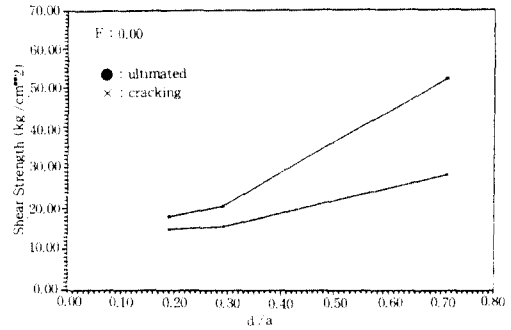


Fig. 7(a) Shear strength plotted against shear span-to-depth ratio( $F=0$ )

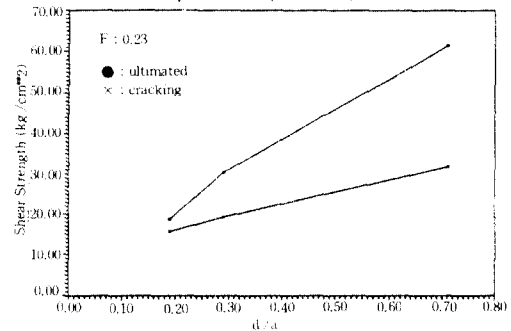


Fig. 7(b) Shear strength plotted against shear span-to-depth ratio( $F=0.23$ )

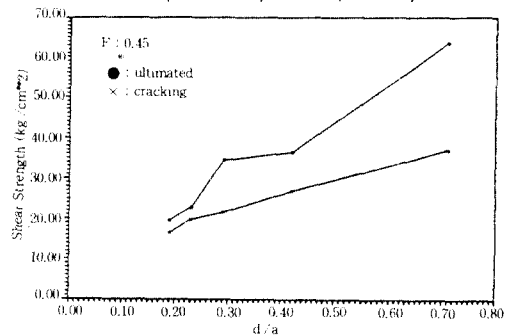


Fig. 7(c) Shear strength plotted against shear span-to-depth ratio( $F=0.45$ )

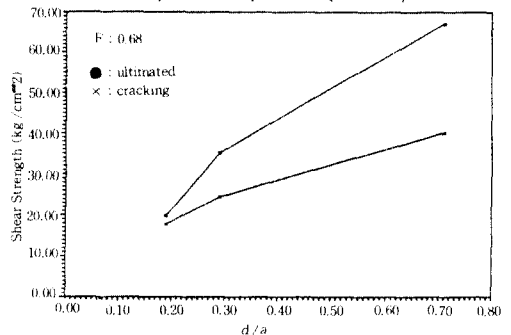


Fig. 7(d) Shear strength plotted against shear span-to-depth ratio( $F=0.68$ )



열 및 극한전단강도 예측식 (3)과 (10), Sharma<sup>(12)</sup>에 의해 제안된 극한전단강도 예측식 (11)을 본 연구의 실험결과와 비교한 결과 전단파괴를 일으키는  $a/d$  1.4와 2.4, 3.4인 보의 실험결과가 매우 높게 나타나 이들 제안 식들이 실험결과와 잘 일치하지 않음을 보여주었다. Fig. 6과 Table 3에 나타낸 식 (10)의 계산에서  $v_f$ 의 값은 Swamy 등<sup>(13)</sup>이 실험을 통해 얻은 섬유유리의 평균부착응력  $42.3 \text{ kg/cm}^2$ 를 사용한 것이다.

실험된 보에서 강섬유의 혼입율이 0%( $F=0$ ), 0.5%( $F=0.23$ ), 1.0%( $F=0.45$ ), 1.5%( $F=0.68$ ) 등으로 변화됨에 따라 각 변수들이 전단강도에 미치는 영향은 Fig. 7과 같다. 전단지간-유효높이의 비  $a/d$ 에 따라 보의 균열 및 극한전단강도는 변화되었는데, 모든 보에서  $a/d$ 가 감소( $d/a$ 가 증가)함에 따라 균열전단강도 이후에 받는 추가하중의 양이 현저히 커짐을 알 수 있었으며 다른 연구들<sup>(4~10)</sup>에서도 이와 유사한 경향들이 발견되었다.

국내외에서 제안된 섬유보강콘크리트 보에 관한 기존의 극한전단강도 예측공식 (10)과 (12)는 사인장균열 주위에서 발생하는 섬유유리의 뿔힘응력을 식 (8)로 계산하는 것이다. 그러나 식 (8)로부터 얻어지는 값은 섬유유의 배향성과 형상비 및 혼입율 등에 따라 일정한 값이 되기 때문에  $a/d$ 의 변화는 고려될 수 없었다.

본 연구에서는 실험으로부터  $a/d$ 가 변화함에 따라 보의 추가하중 변화량을 Fig. 7과 같이 추정할 수 있었으므로, 이에 따라 본 연구의 실험과 동일한 방식으로 수행된 36개 보에 대한 실험성과<sup>(8)</sup>와 본 실험의 성과 14개를 합해 총 50개 보에 대한 실험결과를 회귀분석하였다. 분석결과 강섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도와 극한전단강도를  $a/d$ 와 활열인장강도 변화에 따라 보다 합리적으로 추정할 수 있는 다음과 같은 식을 제안하고자 한다.

$$v_f = \sigma_{spf} d/a [A^* \rho_s^{1/3} + B^* F] \quad (13)$$

여기서,  $A^*$ 와  $B^*$ 는 무차원계수로써 균열전단강도 추정시의  $A^*$ 는 4.13,  $B^*$ 는 0.20이고, 극한전단강도 추정시의  $A^*$ 와  $B^*$ 는 6.67과 0.30이다. 이 식

을 이용한 결과와 실험된 보의 성과는 균열전단강도에서 0.848, 극한전단강도에서 0.943의 비교적 높은 상관계수를 가졌다. Fig. 8과 Fig. 9는 식 (13)로 계산된 균열 및 극한전단강도  $v_{cp}$  및  $v_{up}$ 와 실험에서 측정된 균열 및 극한전단강도  $v_{co}$  및  $v_{uo}$ 를 비교한 것이다.

제안된 식 (13)을 분석하는데 사용된 실험성과는 Table 3과 같으며, 철근콘크리트 보의 균열전단강도와 극한전단강도에 강섬유가 혼입되므로써 얻어지는 강섬유의 기여강도  $v_f$ '는 식 (13)의 제 1항 중에서 강섬유의 혼입으로 추가되는 콘크리트의 활열인장강도 증가에 따른 몫과 제 2항의 섬유계수  $F$ 와  $a/d$ 로 부터 얻어지는 다음 식으로 추정할 수 있을 것이다.

$$v_f' = A^*(\sigma_{spf} - \sigma_{sp}) \rho_s^{1/3} d/a + B^* \sigma_{spf} d/a F \quad (14)$$

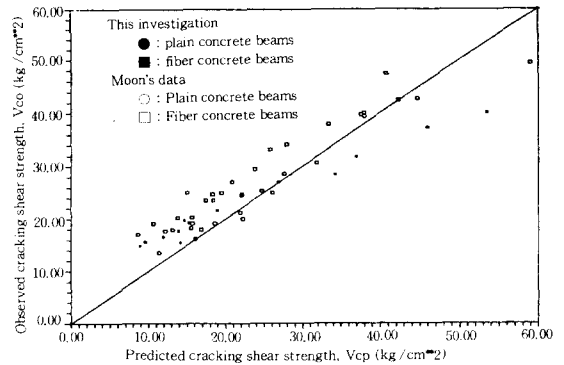


Fig. 8 Observed cracking shear strength versus predicted value using the proposed Eq. (13)

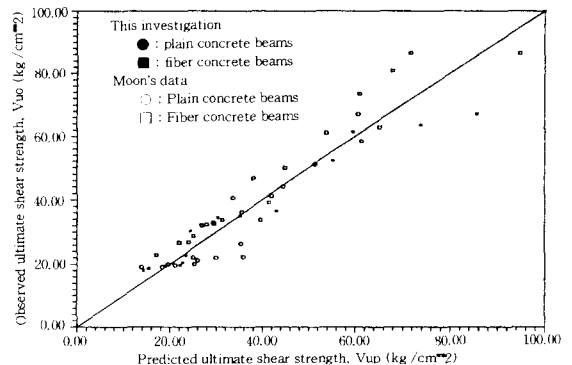


Fig. 9 Observed ultimate shear strength versus predicted value using the proposed Eq. (13)

Table 3 Comparisons of beam details

Investigator	Beam No.	$\sigma_c$ or $\sigma_{cf}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{sp}$ or $\sigma_{sp1}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	a/d	$\rho$	F	Observed Shear Strength (kg/cm <sup>2</sup> )		Narayanan's Eq. (kg/cm <sup>2</sup> )		Sharma's Eq. (kg/cm <sup>2</sup> )	Proposed Shear Strength (kg/cm <sup>2</sup> )		$v_{co}/v_{cp}$ (8)/(13)	$v_{uo}/v_{up}$ (9)/(14)
							$v_{co}$	$v_{uo}$	$v_{c1}$	$v_{uf}$	$v_{uf}$	$v_{cp}$	$v_{up}$		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
Author's (Moon's)	SAP 1	228	24.8	1.4	0.023	0.00	27.06	40.59	9.30	38.72	15.20	20.81	33.60	1.30	1.21
	2	228	24.8	2.4	0.023	0.00	17.65	20.00	7.91	16.07	13.28	12.14	19.60	1.45	1.02
	3	228	24.8	3.4	0.023	0.00	17.06	19.12	7.33	11.47	12.18	8.57	13.84	1.99	1.38
	SAF 1	247	28.5	1.4	0.023	0.45	33.24	39.12	12.49	48.11	17.47	25.74	41.36	1.29	0.95
	2	247	28.5	2.4	0.023	0.45	25.00	26.94	11.09	24.72	15.27	15.02	24.13	1.66	1.12
	3	247	28.5	3.4	0.023	0.45	19.12	22.94	10.52	19.98	13.99	10.60	17.03	1.80	1.35
	SBP 1	433	37.9	1.4	0.023	0.00	30.59	51.18	12.45	45.00	23.23	31.80	51.35	0.96	1.00
	2	433	37.9	2.4	0.023	0.00	19.12	22.06	11.05	19.74	20.30	18.55	29.95	1.03	0.74
	3	433	37.9	3.4	0.023	0.00	17.94	19.71	10.48	14.62	18.61	13.09	21.14	1.37	0.93
	4	433	37.9	1.4	0.015	0.00	28.53	44.12	11.28	35.68	23.23	27.57	44.53	1.03	0.99
	5	433	37.9	2.4	0.015	0.00	16.18	21.18	10.37	16.56	20.30	16.08	25.98	1.01	0.82
	6	433	37.9	3.4	0.015	0.00	13.53	19.12	10.00	12.70	18.61	11.35	18.34	1.19	1.04
	SBF 1	460	42.0	0.9	0.023	0.45	49.41	86.47	17.59	103.86	28.75	59.01	94.82	0.84	0.91
	2	460	42.0	1.4	0.023	0.45	40.00	73.53	15.73	54.59	25.74	37.94	60.96	1.05	1.21
	3	460	42.0	2.4	0.023	0.45	24.71	36.18	14.33	28.50	22.50	22.13	35.56	1.12	1.02
	4	460	42.0	3.4	0.023	0.45	20.29	28.82	13.76	23.22	20.62	15.62	25.10	1.30	1.15
	5	460	42.0	1.9	0.023	0.45	34.12	50.00	14.84	37.03	23.85	27.95	44.91	1.22	1.11
	6	460	42.0	2.9	0.023	0.45	24.71	32.94	13.99	24.17	21.46	18.31	29.43	1.35	1.12
	7	444	38.3	1.4	0.023	0.23	37.94	61.18	13.72	49.09	23.47	33.39	53.78	1.14	1.14
	8	444	38.3	2.4	0.023	0.23	25.00	33.82	12.32	23.74	20.51	19.48	31.37	1.28	1.08
	9	444	38.3	3.4	0.023	0.23	20.29	26.76	11.74	18.61	18.80	13.75	22.14	1.48	1.21
	10	462	43.5	1.4	0.023	0.68	47.35	62.94	17.26	59.21	26.66	40.72	65.28	1.16	0.96
	11	462	43.5	2.4	0.023	0.68	29.41	46.76	15.86	32.82	23.30	23.75	38.08	1.24	1.23
	12	462	43.5	3.4	0.023	0.68	17.94	32.05	15.29	27.47	21.36	16.77	26.88	1.07	1.19
	SCP 1	493	45.3	1.4	0.023	0.00	39.41	58.53	14.22	48.56	27.76	38.00	61.38	1.04	0.95
	2	493	45.3	2.4	0.023	0.00	20.00	22.35	12.83	21.81	24.26	22.17	35.80	0.90	0.62
	3	493	45.3	3.4	0.023	0.00	19.12	20.00	12.25	16.39	22.24	15.65	25.27	1.22	0.79
	SCF 1	523	46.8	1.4	0.023	0.45	42.35	80.88	16.88	56.90	28.68	42.27	67.92	1.00	1.19
	2	523	46.8	2.4	0.023	0.45	25.29	33.82	15.48	29.85	25.07	24.66	39.62	1.03	0.85
	3	523	46.8	3.4	0.023	0.45	23.53	32.35	14.91	24.37	22.98	17.41	27.97	1.35	1.16
SDP 1	551	44.8	1.4	0.023	0.00	39.71	67.06	14.10	48.32	27.46	37.58	60.70	1.06	1.10	
2	551	44.8	2.4	0.023	0.00	21.17	26.47	12.71	21.67	24.00	21.92	35.41	0.97	0.75	
3	551	44.8	3.4	0.023	0.00	18.24	22.06	12.13	16.27	21.99	15.48	24.99	1.18	0.88	
SDF 1	572	49.5	1.4	0.023	0.45	42.65	86.47	17.53	58.19	30.34	44.71	71.84	0.95	1.20	
2	572	49.5	2.4	0.023	0.45	25.00	41.18	16.13	30.60	26.51	26.08	41.91	0.96	0.98	
3	572	49.5	3.4	0.023	0.45	23.53	32.65	15.56	25.02	24.30	18.41	29.58	1.28	1.10	
This Investi- gation	SSAP 1	411	40.8	1.4	0.023	0.00	28.41	52.29	13.14	46.40	25.01	34.23	55.28	0.83	0.95
	2	411	40.8	3.4	0.023	0.00	15.56	20.56	11.17	15.31	20.03	14.09	22.76	1.10	0.90
	3	411	40.8	5.4	0.023	0.00	14.88	18.03	10.66	13.27	17.84	8.87	14.33	1.68	1.26
	SSAF 1	455	50.9	1.4	0.023	0.45	37.24	63.56	17.86	58.86	31.20	45.97	73.87	0.81	0.86
	2	455	50.9	2.4	0.023	0.45	26.91	36.47	16.47	31.00	27.26	26.82	43.09	1.00	0.85
	3	455	50.9	3.4	0.023	0.45	21.59	34.53	15.89	25.36	24.99	18.93	30.42	1.14	1.14
	4	455	50.9	4.4	0.023	0.45	19.82	22.85	15.58	24.10	23.43	14.63	23.50	1.35	0.97
	5	455	50.9	5.4	0.023	0.45	16.56	19.56	15.38	23.31	22.26	11.92	19.15	1.39	1.02
	6	441	42.4	1.4	0.023	0.23	31.79	61.53	14.70	51.06	25.99	36.96	59.54	0.86	1.03
	7	441	42.4	3.4	0.023	0.23	19.26	30.44	12.73	19.59	20.82	15.22	24.52	1.27	1.24
	8	441	42.4	5.4	0.023	0.23	15.62	18.74	12.22	17.55	18.54	9.58	15.44	1.63	1.21
9	518	57.1	1.4	0.023	0.68	40.06	67.15	20.52	65.73	35.00	53.45	85.69	0.75	0.78	
10	518	57.1	3.4	0.023	0.68	24.41	35.03	18.55	30.74	28.03	22.01	35.28	1.11	0.99	
11	518	57.1	5.4	0.023	0.68	17.74	19.79	18.04	28.69	24.97	13.86	22.21	1.28	0.89	

## 5. 결 론

본 연구는 실험을 통해 섬유혼입율과 전단시간의 변화에 따른 강섬유보강 철근콘크리트 보의 전단거동을 알아보고자 수행하였다.

실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 초기균열발생 후 보의 추가하중 증가율은  $a/d$ 가 작아지고 섬유계수가 커질수록 많아졌으며,  $a/d$ 가 3.4를 초과하는 보는 휨에 의해 파괴되었다.

2. 실험결과를 근거로 복부보강이 없는 강섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도와 극한전단강도를 기존의 식 보다 합리적으로 예측할 수 있는 추정식을 제안했으며, 제안된 식 (13)은 실험결과와 잘 일치했다.

3. 식 (14)로 부터 철근콘크리트 보에 강섬유가 혼입되므로써 얻어지는 전단강도에 대한 섬유의 기여효과를 추정할 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 1993년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Romualdi J. P. and Baston G. B., "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement", ACI Journal, Vol. 60, June 1963, pp.775-790.
2. Swamy R. N. and Bahia H. M., "Influence of Fiber Reinforcement on the Dowel Resistance to Shear", ACI Journal, Symposium Paper, Title No. 76-17, March 1979.
3. ACI Committee 544, "Design Consideration for Steel Fiber Reinforced Concrete", ACI Struct. Journal, Vol. 85, No. 5, Sep.-Oct. 1988, pp.563-580.
4. Batson G., Jenkins E. and Spatney R., "Steel Fibers as Shear Reinforcement in Beams", ACI Struct. Journal, Oct. 1972, pp.640-644.
5. Mansur M. A., Ong K. C. \*G. and Paramasivan P., "Shear strength of Fibrous Concrete Beams without Stirrups", ASCE Struct. Journal, 1986, pp.2066-2079.
6. Mansur M. A., Lee C. K. and Lee S. L., "Deformed Wire Fabric as Shear Reinforcement in Concrete Beams", ACI Struct. Journal, Sep.-Oct. 1987, pp.392-399.
7. Narayanan, R. and Darwish, I. Y. S., "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement", ACI Struct. Journal, May-June 1987, pp.216-227.
8. 문제길, 홍익표, "강섬유보강콘크리트 보의 전단 특성에 관한 연구", 대한 토목학회 논문집, 제 13 권 제 3호, 1993. 7, pp.1-12.
9. Narayanan, R. and Darwish, I. Y. S., "Fiber Concrete Deep Beams in Shear", ACI Struct. Journal, March-April 1988, pp.141-149.
10. Narayanan, R. and Darwish, I. Y. S., "Shear in Mortar Beams Containing Fibers and Fly Ash", ASCE Struct. Journal, 1988, pp.84-102.
11. Romualdi, J. P. and Mandel, J. A., "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement", ACI Journal, Vol. 61, No. 6, June 1964, pp.657-671.
12. Sharma, A. K., "Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams", ACI Journal, Vol. 83, No. 4, July-Aug. 1986, pp. 624-628.
13. Swamy, R. N., Mangat, P. S. and Rao, C. V. S. K., "The Mechanics of Fiber Reinforcement of Cement Matrices", Fiber Reinforced Concrete, SP-44, ACI, 1974, pp.1-28.

(접수일자 : 1994. 1. 12)